

- стальных оболочек при взрыве внутри них зарядов взрывчатого вещества.— ПМТФ, 1968, № 6.
7. Бодренко С. И., Глушак Б. Л., Новиков С. А., Синицын В. А., Чеверикин А. М. Расчетно-экспериментальное исследование поведения замкнутой сферической оболочки при взрыве в ее полости сферического заряда взрывчатого вещества.— В кн.: Тезисы докл. II Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. М., 1976.
  8. Шитов А. Т., Минеев В. Н. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций.— ФГВ, 1976, № 2.
  9. Баталов В. А., Свидинский В. А., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа VII для решения одномерных газодинамических и упругопластических задач в механике сплошной среды.— В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. Вып. 1(1), М.: ЦНИИатоминформ, 1978.
  10. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ.— ПМТФ, 1969, № 4.
  11. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
  12. Ahrens J. Thomas, Kovach B. Explosive gas blast: the expansion of detonation products in vacuum.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 2.
  13. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
  14. Forrestal M. J. and Sagartz M. Elastic-plastic response of 304 stainless steel beams to impulse loads.— J. Appl. Mech., 1978, vol. 45, p. 685.

УДК 539.4

## РАЗРУШЕНИЕ И ВЯЗКОСТЬ СВИНЦА ПРИ ОТКОЛЕ

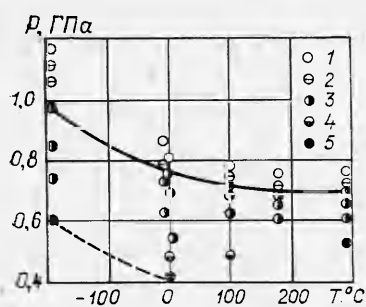
*В. К. Голубев, С. А. Новиков, Ю. С. Соболев,  
Н. А. Юкина*

*(Москва)*

Исследования откольного разрушения свинца при интенсивных взрывных и ударных нагрузках проводились в работах [1—4]. Налицо существенное (более чем на порядок) превышение динамической прочности материала, реализующейся при отколе, по сравнению с прочностью в квазистатических условиях одноосного растяжения и кручения [5, 6]. Это хорошо согласуется с наблюдаемой в [1] тенденцией к увеличению отношения прочности, реализующейся при отколе, к статической прочности при повышении пластичности материала.

Предварительные результаты исследования откольного разрушения свинца в температурном диапазоне —196—300°C приводились в [3], где определены критические уровни нагружения, соответствующие макроскопическому разрушению материала. В данной работе проведены дополнительные эксперименты с целью определения уровней нагружения, соответствующих зарождению в материале откольных микроразрушений, детальный металлографический анализ образцов с целью определения характера разрушения, а также расчетные оценки вязкости свинца в условиях откольного разрушения. Схема проведения экспериментов приводилась в [7], метод металлографического анализа использовался для определения характера откольного разрушения сталей в широком температурном диапазоне [8].

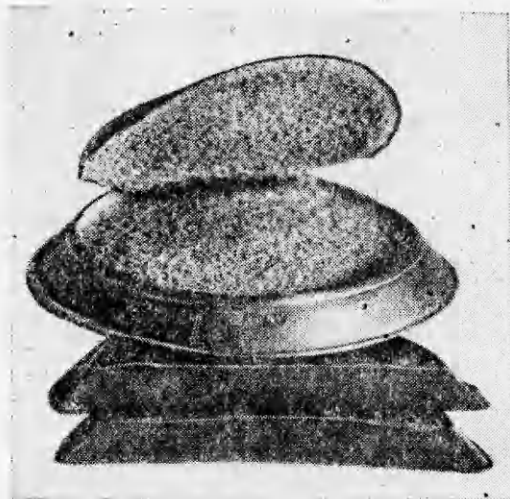
Образцы из свинца С2 толщиной 4 мм и диаметром 40 мм крепились к медному экрану толщиной 12 мм. Импульсное механическое нагружение образцов осуществлялось ударом по медному экрану алюминиевой пластины толщиной 4 мм. Известной скорости удара ставилось в соответствие расчетно оцененное значение давления в нагружающем импульсе сжатия, отражение которого от свободной поверхности образца в виде импульса растяжения и приводило к откольному разрушению свинца. Для создания условий отражения в свинец импульса растяжения с отрицательным давлением менее 0,6 ГПа к свинцовому образцу поджималась пластина из фторопласта-4. Используемые для расчетных оценок известные ударные адиабаты материалов в виде линейных  $D$  —  $u$ -соотношений приводились, например, в [4, 7]. Характерное время нагружения ориентировочно оценивалось в 1,3—1,5 мкс. Правомерность используемого оценочного расчета условий нагружения подтверждена экспериментально при помощи манганинового датчика давления [9]. Результаты регистрации нагружающего импульса сжатия манганиновым датчиком давления показали, что расчетные оценки не выходят за пределы погрешности дат-



Ф и г. 1

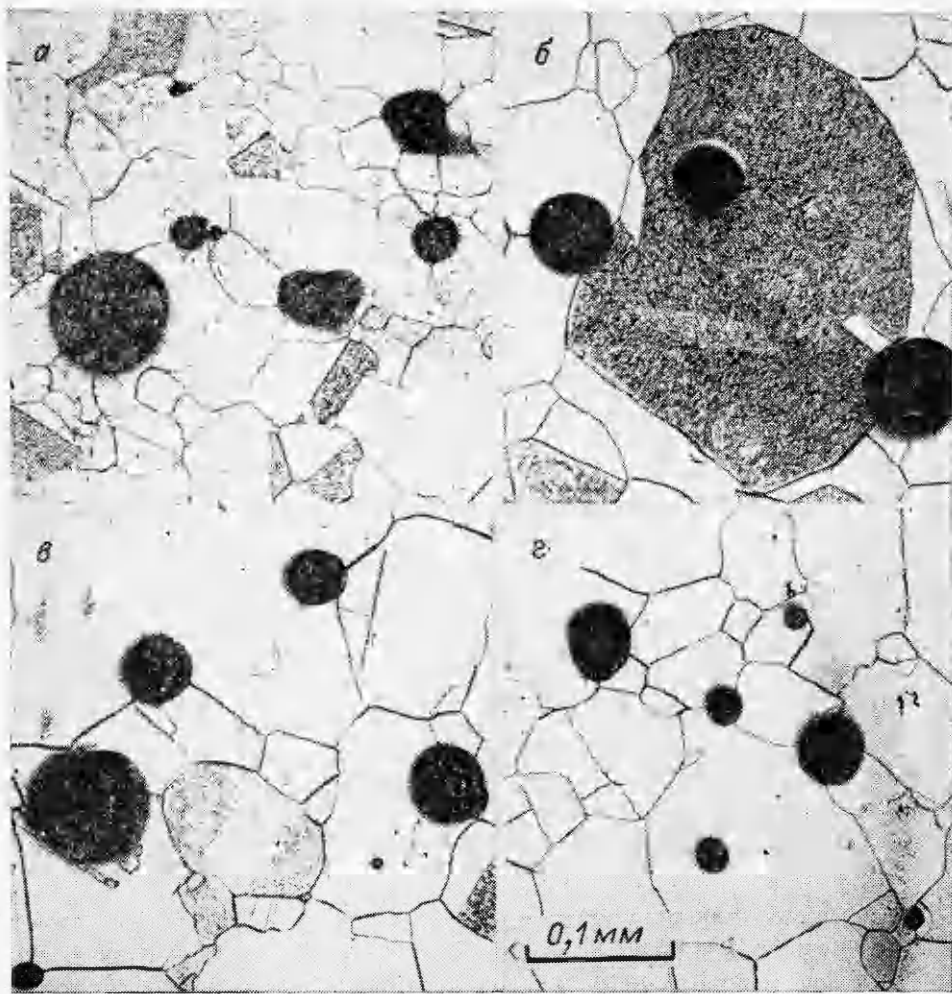
чика, а характерная длительность импульса на полувысоте около 1,5 мкс.

Результаты проведенных экспериментов даны на фиг. 1, где конкретным условиям нагружения ставится в соответствие степень откольного повреждения материала, определяемая при наблюдении продольного среза образца под микроскопом. В соответствии с наблюдаемой картиной разрушения степень откольного повреждения материала условно подразделялась на пять градаций: 1 — полное откольное разрушение — отслоение всего откольного слоя; 2 — частичное откольное разрушение — отслоение части откольного слоя; 3 — интенсивное микроразрушение материала — наличие в зоне откола значительного числа повреждений в виде изолированных либо коалесцировавших пор; 4 — слабое микроразрушение материала — наличие в зоне откола либо в ее отдельных частях небольшого числа изолированных пор; 5 — фактическое отсутствие откольного разрушения. Следует все же отметить, что и в случае 5 в сечении среза образцов наблюдались единичные и сравнительно мелкие повреждения. Уровни нагружения, соответствующие нарушению макроскопической и микроскопической целостности материала, отмечены на фиг. 1 соответственно сплошной и штриховой линиями. Внешний вид образцов, испытанных при температуре около 0°C, приведен на фиг. 2. Значение давления в нагружающем импульсе соответственно 0,76; 0,78 и 0,81 ГПа.



Ф и г. 2

Для металлографического исследования продольный срез образца делался острым ножом при помощи ручного пресса. В этом случае материал практически не деформировался, и на поверхности среза, казалось бы, неповрежденного образца сразу же можно было наблюдать значительное число микроповреждений в зоне откола. Последующая химическая полировка среза проводилась в реактиве, содержащем равные количества уксусной кислоты и перекиси водорода. Средний размер зерна исследуемых образцов составлял 80—90 мкм, причем не было отмечено изменения размера зерна при нагреве до 300°C. На фиг. 3 приведены фрагменты зоны откольного повреждения свинца при различных температурах испытания. Обозначения *a* — *г* соответствуют температурам —196; 0; 100 и 300°C и давлениям 0,75 ГПа для  $T = -196^\circ\text{C}$  и 0,6 для остальных. Видно, что начальная стадия откольного разрушения свинца во всем исследуемом температурном диапазоне связана с зарождением и ростом пор, форма которых близка к сферической. Аналогичный характер откольного разрушения наблюдался в работе [10] для алюминия и меди при нормальной температуре испытания. Зарождение пор происходит, как правило, в местах возможной концентрации микронапряжений, таких как границы зерен и двойников, но наблюдается также и внутри зерен, по-видимому, в местах расположения, не выявляемых посредством оптической микроскопии дефектов структуры. Образцы, нагружаемые импуль-



Фиг. 3

сом давления 0,6 ГПа при температурах 0—300°C, обследовались более детально при увеличении  $\times 1000$ . Минимальный и максимальный размеры наблюдаемых пор при всех температурах испытания примерно 1 и 100 мкм. При более высоких уровнях нагружения наблюдается некоторое увеличение максимального размера отдельных пор, но в связи с увеличением их плотности основным процессом, ответственным за разрушение, становится коалесценция. Для температуры  $-196^\circ\text{C}$  отличие связано лишь с некоторым повышением соответствующих уровней нагружения. При всех температурах испытания большинство откольных повреждений сосредоточено в зоне шириной около 1 мм.

В квазистатических условиях одноосного растяжения при минимально возможном времени нагружения  $t = 10^{-2}$  с в [5, 6] получены значения прочности свинца, равные соответственно 18 и 30 МПа. Наблюдаемое превышение прочности свинца, реализующейся при отколе, по сравнению с результатами статических испытаний обусловлено как значительным снижением времени нагружения, так и стеснением пластической деформации материала в условиях трехосного растяжения. Стеснение пластической деформации затрудняет образование пор в пластичном материале и приводит к значительному повышению прочности при статических условиях нагружения [11]. В условиях же динамического ударно-волнового нагружения такого пластичного материала, как свинец, в зоне отрицательных давлений реализуется состояние, близкое к гидроста-

тическому растяжению, т. е. обладающее максимально возможной степенью стеснения макроскопической пластической деформации. Таким образом, определяющую роль в зарождении пор имеет пластическая деформация материала на микроуровне, обуславливающая образование дислокационных скоплений у таких преград, как границы зерен и двойников.

Уровни нагружения, соответствующие макроскопическому разрушению свинца при отколе, оценивались в [1, 2, 4] по толщине откольного слоя и определяемому экспериментально [1] либо расчетно [2, 4] профилю ударной волны, выходящей на свободную поверхность образца. Полученные таким образом значения разрушающих нагрузок имеют тенденцию к увеличению при уменьшении характерного времени нагружения. Необходимо отметить, что значение нагрузки, соответствующей макроскопическому разрушению материала, является лишь верхней оценкой в связи с неучетом релаксации отрицательного давления в импульсе растяжения, обусловленной зарождением и ростом значительного числа микроповреждений, образующихся при более низких уровнях нагружения.

Наблюдаемый в работе характер откольного разрушения свинца обусловлен зарождением и ростом большого числа сферических пор. Диапазон размеров наблюдаемых пор при конкретных условиях испытаний составляет  $\sim 1-100$  мкм. Представляется целесообразным провести оценочный расчет роста изолированной поры при условиях нагружения, соответствующих умеренному уровню откольного повреждения материала, что может дать дополнительную информацию о сопротивлении материала деформированию при высоких скоростях деформации, реализующихся при отколе.

Как отмечалось в [12], скорость деформации материала в слое пор при вязком динамическом разрушении превышает  $10^6$  с $^{-1}$ . При такой скорости деформации вязкостная составляющая сопротивления деформированию становится определяющей даже для материалов с относительно невысокой вязкостью. Для свинца, обладающего низким значением пластической составляющей сопротивления деформированию, оценочный расчет роста изолированной поры может быть вполне корректно выполнен с использованием модели вязкой несжимаемой жидкости.

Воспользуемся предложенным в [13] приближенным аналитическим методом расчета роста пузырька в вязкой жидкости, вызванного кратковременным импульсом отрицательного давления. Отметим кратко сущность используемого метода. Определяющее уравнение для радиуса пузырька  $R(t)$  имеет вид

$$(1) \quad R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu}{\rho R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho} P(t),$$

где  $\rho$  и  $\mu$  — плотность и коэффициент вязкости жидкости. Начальные условия и нагружающий импульс давления берутся в виде

$$R(0) = R_0, \quad \frac{dR}{dt}(0) = 0, \quad P(t) = \begin{cases} P_0, & 0 < t < t_0, \\ 0, & t > t_0. \end{cases}$$

Введение безразмерных координат и параметров

$$r = R/R_0, \quad \tau = t/t_0, \quad \eta = 4\mu t_0/\rho R_0^2, \quad p = P_0 t_0^2/\rho R_0^2$$

приводит уравнение (1) к виду

$$(2) \quad r \frac{d^2 r}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dr}{d\tau} \right)^2 + \frac{\eta}{r} \frac{dr}{d\tau} = p [H(\tau) - H(\tau - 1)],$$

$$r(0) = 1, \quad \frac{dr}{d\tau}(0) = 0,$$

где  $H(\tau)$  — ступенчатая функция Хевисайда. Для  $0 < \tau < 1$  первый интеграл уравнения (2) дается приближенной формулой

$$(3) \quad dr/d\tau = -\eta/3r + [(\eta/3r)^2 + (2/3)p(1 - 1/r^3)]^{1/2},$$

а для  $\tau > 1$  первым интегралом будет

$$(4) \quad dr/d\tau = b/r^3 - 2\eta/r,$$

где  $b$  — постоянная интегрирования, определяемая при  $r = r_1$ ;  $r_1$  — радиус пузырька при  $\tau = 1$ . Из условия  $dr/d\tau = 0$  определяется максимальный радиус расширяющегося пузырька  $r_2$ :

$$(5) \quad r_2 = b^2/4\eta^2.$$

В случае  $p/\eta^2 \ll 1$  для не очень больших  $r$  (3) может быть приближенно записано в виде

$$dr/d\tau \approx (p/\eta)r(1 - 1/r^3),$$

что, исключая также и случай малых  $r$ , дает приближенное значение  $r_1$ :

$$(6) \quad r_1 \approx \exp(p/\eta).$$

Из (6) видно, что необходимым условием возникновения кавитации в вязкой жидкости является условие  $p/\eta > 1$ , из которого сразу же может быть получена верхняя оценка для вязкости свинца в условиях откольного разрушения  $p/\eta = P_0 t_0 / 4\mu > 1$ . Для  $P_0 = 0,6$  ГПа и  $t_0 = 10^{-6}$  с верхняя оценка  $\mu$  дает  $1,5 \cdot 10^2$  Па·с.

Если значение  $p/\eta$  велико в предположении увеличения  $r$  до значения, много большего единицы, уравнение (3) может быть приближенно записано в виде

$$(7) \quad \frac{1}{2} \frac{dr^2}{d\tau} = -\frac{\eta}{3} + \left[ \left( \frac{\eta}{3} \right)^2 + \frac{2}{3} pr^2 \right]^{1/2}.$$

Интегрируя (7), находим

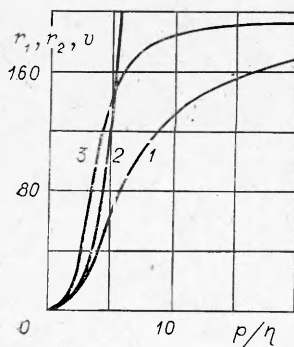
$$(8) \quad \frac{2p}{\eta} = \left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} r_1^2 \right)^{1/2} - \left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} \right)^{1/2} + \ln \frac{\left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} r_1^2 \right)^{1/2} - 1}{\left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} \right)^{1/2} - 1}.$$

Учитывая условие  $p/\eta^2 \ll 1$ , несколько упрощаем (8):

$$(9) \quad \left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} r_1^2 \right)^{1/2} + \ln \left[ \left( 1 + \frac{6p}{\eta^2} r_1^2 \right)^{1/2} - 1 \right] - \frac{2p}{\eta} - 1 + \ln \frac{\eta^2}{3p} = 0.$$

Дальнейшие упрощения, проведенные в [13], становятся некорректными для условий рассматриваемой в данной работе задачи. Тем не менее определение  $r_1$  для конкретного значения  $p = 2 \cdot 10^9$  и ряда значений  $p/\eta$ , например в диапазоне 2—20, сводится к элементарному численному решению трансцендентного уравнения (9). Определив таким образом  $r_1$ , из (3) находим  $v = dr/d\tau$  на этом радиусе, затем из (4) определяем  $b$  и окончательно из (5) получаем значение  $r_2$ . Полученные зависимости  $r_1$ ,  $r_2$  и  $v$  (кривые 1—3) приведены на фиг. 4.

Наблюдаемая на фиг. 4 сильная зависимость  $r_2$  от параметра  $p/\eta$  позволяет довольно корректно оценить величину коэффициента динамической вязкости свинца в условиях откольного разрушения. Результаты проведенного металлографического анализа образцов показывают, что  $r_2 \approx 100$ . Необходимо отметить, что на конечной стадии инерционного расширения поры ( $\tau > 1$ ) пластическая составляющая сопротивления деформированию уже вносит определяющий вклад в замедление расширяющейся поры. Это должно приводить к снижению реального значения  $r_2$ , соответствующего конкретному значению  $p/\eta$ . Таким образом, значение параметра  $p/\eta = 5$  дает,



Ф и г. 4

по-видимому, вполне удовлетворительную оценку вязкости свинца  $\mu \approx 30$  Па·с, а диапазон  $p/\eta = 4-6$  уже содержит реальное значение  $\mu$  с большой степенью достоверности, так как значение  $r_2$  для  $p/\eta = 6$  составляет 250. Оценка величины радиальной составляющей скорости деформации дает

$$\dot{\varepsilon}_r \approx \frac{d\left(\frac{dR}{dt}\right)}{dR} - \frac{1}{t_0} \frac{d\left(\frac{dr}{dr}\right)}{dr} \approx \frac{1}{t_0} \frac{p}{\eta} = 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

Определение коэффициента динамической вязкости свинца при ударно-волновом сжатии проводилось в [14, 15]. В первой использовался метод, основанный на наблюдении развития малых возмущений на фронте ударной волны с давлением 35 ГПа, во второй при меньших на порядок давлениях вязкость определялась по экспериментально определяемой зависимости смещения фиксированной линии при косом соударении пластин. Полученные оценочные значения  $\mu$  составляют  $4 \cdot 10^3$  и  $5 \times 10^3$  Па·с, т. е. фактически совпадают, а скорость деформации в [14] оценивалась в  $10^7 \text{ с}^{-1}$ .

В связи со сложностью явлений, лежащих в основе закономерностей вязкого поведения твердых тел, отметим лишь некоторые возможные факторы, которые могут оказывать влияние на эти закономерности. Так, в [14] отмечается, что при давлении  $\sim 30$  ГПа вязкость алюминия не зависит от скорости деформации в диапазоне  $\sim 10^5-10^7 \text{ с}^{-1}$ . Сопоставление результатов работ [14] и [15] не указывает также на то, что в этом диапазоне скоростей деформации давление оказывает определяющее влияние на вязкость металлов, тогда как для воды взаимосвязь вязкости с давлением наблюдается явно в [16]. В условиях вязкого откольного разрушения алюминия и меди [10] наблюдаемые размеры пор описывались формулой, подобной (6), причем используемое для обоих металлов значение  $\mu$  составляло 20 Па·с. Результаты данной работы указывают, что изменение температуры в широких пределах не оказывает существенного влияния на определяемое для свинца значение  $\mu$ . Возможное влияние на определяемое значение вязкости свинца, как, впрочем, и других пластичных металлов, по-видимому, оказывает масштаб рассматриваемого явления. При рассмотрении расширения изолированной поры вязкое течение ограничено одним либо несколькими близлежащими зернами, т. е. полученное значение коэффициента вязкости в чистом виде определяет вязкость реальной кристаллической структуры, обусловленную динамическим торможением подвижных дислокаций. В случае же макроскопического рассмотрения явления более высокое значение коэффициента динамической вязкости может быть отчасти связано с ассоциированным течением большого числа деформируемых в процессе течения кристаллитов.

Поступила 16 IX 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витман Ф. Ф., Иванов М. И., Иоффе Б. С. Сопротивление разрушению пластичных металлов при импульсном нагружении.— ФММ, 1964, т. 18, вып. 5.
2. Breed V. R., Mader C. L., Venabl D. Technique for the determination of dynamic-tensile-strength characteristics.— J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, N 8.
3. Новиков С. А., Голубев В. К., Соболев Ю. С., Синицын В. А. Влияние температуры на величину разрушающих напряжений при отколе в металлах.— В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Вып. 11. Горький: изд. ГГУ, 1979.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Синицына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ.— ПМТФ, 1981, № 2.
5. Журков С. Н., Бетехтин В. И. Закономерность разрушения металлов с различным типом кристаллической решетки.— ФММ, 1967, т. 24, вып. 5.
6. Степанов В. А., Шмелев А. Г., Шпейзман В. В. Влияние температуры на энергию активации процесса разрушения металлов.— ФММ, 1967, т. 24, вып. 6.
7. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов.— ПМТФ, 1980, № 4.

8. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. О механизмах откольного разрушения сталей Ст. 3 и 12Х18Н10Т в температурном диапазоне — 196—800°С.— Проблемы прочности, 1981, № 5.
9. Батьков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерения импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. М.: изд. ВНИИФТРИ, 1976.
10. Barbee T. W., Seaman L. et al. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals.— J. Materials, 1972, vol. 7, N 3.
11. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970.
12. Фадеев Ю. И. Временные критерии разрушения в динамике твердого тела.— В сб.: Динамические задачи механики сплошных сред. Вып. 32. Новосибирск: изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1977.
13. Din-Yu Hsieh. Bubble growth in a viscous liquid due to a transient pulse.— Trans. ASME. Ser. D. J. Basic Engineering, 1970, N 4. Рус. пер.: Се Дин-ю. Рост пузырька в вязкой жидкости, вызванный кратковременным импульсом.— Теоретические основы инженерных расчетов, 1970, № 4.
14. Минеев В. Н., Савинов Е. В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии.— ЖЭТФ, 1967, т. 52, вып. 3.
15. Захаренко И. Д., Мали В. И. Вязкость металлов при сварке взрывом.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
16. Альтшулер Л. В., Канель Г. И., Чекин Б. С. Новые измерения вязкости воды за фронтом ударных волн.— ЖЭТФ, 1977, т. 72, вып. 2.

УДК 532.5 : 532.135

## КОЛЕБАНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ СЖАТИИ ВЯЗКОУПРУГОГО ТЕЛА

Г. И. Бурдэ, Т. М. Бурдэ  
(Пермь)

Исследованию различных видов неустойчивости, развивающейся в процессах деформации вязкоупругих материалов, посвящено значительное число работ (см. обзор [1, 2—7]). В этих работах рассматриваются в основном течения растяжения несжимаемых жидкостей. При анализе устойчивости пренебрегается, как правило, инерционными членами в уравнении движения.

В данной работе показано, что при деформациях сжимаемых вязкоупругих тел возможен еще один вид неустойчивости — колебания, обусловленные объемной упругостью материала и раскачивающиеся при вестороннем сжатии образца вследствие инерционного взаимодействия возмущений с основным течением. Из линеаризованных уравнений для малых возмущений определяются условия нарастания колебаний; на основе нелинейного анализа исследуется характер возбуждения колебаний и определяется их амплитуда.

Расчеты проведены для случая плоской однородной деформации и идеально гладких и жестких ограничивающих поверхностей. По-видимому, эти предположения не играют существенной роли в рассматриваемом механизме неустойчивости.

1. Рассмотрим вязкоупругое сжимаемое тело прямоугольной формы (фиг. 1), ограниченное гладкими жесткими плоскостями. Плоскости  $x_1 = \pm L(t)$  перемещаются симметрично друг другу со скоростью  $U = dL/dt$ , а плоскости  $x_2 = \pm R(t)$  — со скоростью  $V = dR/dt$ . Скорости  $U$  и  $V$  могут быть как положительными (растяжение), так и отрицательными (сжатие) и предполагаются постоянными, так что размеры образца изменяются со временем по линейному закону

$$(1.1) \quad L = L_0 + Ut, \quad R = R_0 + Vt.$$

Уравнения, описывающие изотермическое течение материала образца, имеют вид (по повторяющимся индексам подразумевается суммирование)

$$(1.2) \quad \partial \rho / \partial t + \partial(\rho v_k) / \partial x_k = 0;$$

$$(1.3) \quad \rho(\partial v_i / \partial t + v_k \partial v_i / \partial x_k) = \partial \sigma_{ki} / \partial x_k,$$

где  $\rho$  — плотность;  $v_i$  — компоненты скорости;  $\sigma_{ki}$  — компоненты тензора напряжений.